DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160822

刘晓林, 马晓君, 豆攀, 黄科程, 王兴龙, 张頔, 孔凡磊, 袁继超. 种植密度对川中丘陵夏玉米茎秆性状及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 356−364

Liu X L, Ma X J, Dou P, Huang K C, Wang X L, Zhang D, Kong F L, Yuan J C. Effect of planting density on stem characteristics and yield of summer maize in the Hilly Central Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 356−364

种植密度对川中丘陵夏玉米茎秆性状及产量的影响*

刘晓林[1], 马晓君[1], 豆 攀[1], 黄科程[2], 王兴龙[1], 张 頔[1], 孔凡磊[1**], 袁继超[1]

(1. 四川农业大学农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室 成都 611130;
2. 四川省中江县农技站 中江 618100)

摘 要: 以玉米品种'正红 505'为材料, 设置 4.50 万株·hm^{-2}、5.25 万株·hm^{-2}、6.00 万株·hm^{-2}、6.75 万株·hm^{-2}、7.50 万株·hm^{-2} 5 个密度处理, 研究种植密度对川中丘陵夏玉米茎秆性状及产量的影响。结果表明: 随种植密度的增加, 株高、穗位高、节间长、茎节长粗比逐渐增加, 茎粗、茎粗系数、节间干重、单位茎长干物质重、茎秆压碎强度和外皮穿刺强度逐渐减小, 除穗位高外, 其余各性状均存在显著性差异; 其中, 当种植密度增加到 7.50 万株·hm^{-2} 时, 第 1、3、5 茎节的外皮穿刺强度分别较 4.50 万株·hm^{-2} 显著降低 27.10%、22.78%和 30.80%。在本试验设置的密度范围内, 玉米产量随密度的增加而先增后减, 在 6.00 万株·hm^{-2} 处获得最大值, 与 4.50 万株·hm^{-2} 相比, 6.00 万株·hm^{-2} 显著增产 12.02%。随种植密度增加, 玉米穗长、穗粗、成穗率、穗粒数和千粒重显著降低, 有效穗数和秃尖长显著增加。相关分析表明, 茎秆压碎强度与外皮穿刺强度呈极显著正相关(r=0.93**), 且茎秆压碎强度和外皮穿刺强度分别与茎粗、茎粗系数、节间粗、节间干重和单位茎长干物质重呈显著或极显著正相关, 而与株高、节间长和茎节长粗比呈负相关或极显著负相关。其中, 茎秆农艺性状与茎秆压碎强度的相关性更好。单株产量与茎粗、茎粗系数、节间粗、节间干重、单位茎长干物质重、茎秆压碎强度和外皮穿刺强度呈显著或极显著正相关, 与节间长和茎节长粗比呈显著负相关。逐步回归分析表明, 茎粗系数和单位茎长干物质重对茎秆压碎强度的影响最大。综上所述, 种植密度是影响玉米茎秆性状和产量的重要因素, 适当增加种植密度可以显著增加玉米群体产量, 茎粗系数和单位茎长干物质重可以作为评价玉米茎秆抗倒伏能力的重要农艺指标。

关键词: 夏玉米; 密度; 茎秆性状; 抗倒伏能力; 产量; 川中丘陵

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0356-09

Effect of planting density on stem characteristics and yield of summer maize in the Hilly Central Sichuan Basin, China*

LIU Xiaolin[1], MA Xiaojun[1], DOU Pan[1], HUANG Kecheng[2], WANG Xinglong[1], ZHANG Di[1], KONG Fanlei[1**], YUAN Jichao[1]

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Eco-physiology and Farming Systems in Southwest China, Chengdu 611130, China; 2. Agro-technical Station of Zhongjiang County, Zhongjiang 618100, China)

Abstract: Increasing planting density has been one of the most common ways of increasing maize yield. In order to determine

* 国家粮食丰产科技工程(2012BAD04B13)及公益性行业(农业)科研专项(20150312705)资助
** 通讯作者: 孔凡磊, 研究方向为农作制度与作物简化高效栽培理论与技术。E-mail: kflstar@163.com
收稿日期: 2016-09-13 接受日期: 2016-12-29

* Supported by the National Food Science and Technology Project of China (2012BAD04B13) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (20150312705)
** Corresponding author, E-mail: kflstar@163.com
Received Sep. 13, 2016; accepted Dec. 29, 2016

the proper planting density of maize in Hilly Central Sichuan Basin (HCSB) in China, an experiment involving 5 planting densities (4.50×10^4, 5.25×10^4, 6.00×10^4, 6.75×10^4 and 7.50×10^4 plant·hm^{-2}) of maize were conducted. The effects of planting density on stalk characteristics and yield of summer maize cultivar 'Zhenghong-505' were investigated. The results showed that plant height, ear height, internode length, length-to-diameter ratio of internode increased with increasing planting density. Also stem diameter, stem diameter coefficient, internode dry weight, internode dry matter weight to length ratio, stalk crushing strength (SCS) and rind penetration strength (RPS) decreased with increasing planting density. There were significant differences the traits except ear height among different planting densities. Compared with planting density of 4.50×10^4 plant·hm^{-2}, RPS of the 1st, 3rd and 5th internodes reduced significantly respectively by 27.10%, 22.78% and 30.80% under planting density of 7.50×10^4 plant·hm^{-2}. Maize yield increased at first and then decreased with increasing planting density, with a maximum yield under 6.00×10^4 plant·hm^{-2}. There was a significant increase in yield (12.02%) under planting density of 6.00×10^4 plant·hm^{-2} compared with yield under planting density of 4.50×10^4 plant·hm^{-2}. Corncob length, corncob diameter, spike rate, kernel per spike and 1000-seed weight significantly ($P < 0.05$) decreased with increasing planting density, while the effective panicle and barren tip length significantly increased. Correlation analysis indicated that SCS was significantly positively correlated with RPS ($r = 0.93^{**}$). Moreover, SCS and RPS had significantly or extremely significant positive correlation with stem diameter, stem diameter coefficient, internode diameter, internode dry weight and internode dry matter weight to length ratio. SCS and RPS had significantly or extremely significant negative correlation with plant height, internode length and length to diameter ratio. A stronger correlation was found between stalk agronomic trait and SCS. Yield per plant had significant or extremely significant positive correlation with stem diameter, stem diameter coefficient, internode diameter, internode dry weight, internode dry matter weight to length ratio, SCS and RPS. It then had significant negative correlation with internode length and length to diameter ratio. Stepwise regression analysis suggested that stem diameter coefficient and internode dry matter weight to length ratio had the most significant influence on SCS. It was concluded that planting density was the primary factor influencing maize stalk characteristics and yield. An appropriate increase in planting density significantly increased maize yield. Then stem diameter coefficient and internode dry matter weight to length ratio were important agronomic indexes for evaluating lodging resistance of maize stalk.

Keywords: Summer maize; Planting density; Stalk characteristics; Lodging resistant ability; Yield; Hilly Central Sichuan Basin

玉米(*Zea mays*)是我国第一大粮食作物，也是川中丘陵重要的粮食作物之一[1-2]。增加种植密度是挖掘玉米高产潜力的主要措施[3-6]，但密度的增加会影响玉米的茎秆性状，如株高和穗位高变高、茎粗变细和茎秆强度降低等，最终导致玉米茎秆抗倒伏能力降低，增加玉米倒伏的几率[7-9]。相关研究指出，玉米倒伏后干物质积累显著降低、穗长显著变短、穗粗显著变细以及产量显著降低等[10]。据估计，每年因玉米茎秆倒伏而造成的损失在 5%~25%左右，倒伏严重的近乎绝收[11-12]。因此，研究种植密度对玉米茎秆性状的影响以及探究茎秆性状与产量之间的关系，具有重要的理论价值和实践意义。

前人研究表明，种植密度显著影响玉米株高、穗位高、节间长等茎秆农艺性状指标以及茎秆压碎强度、外皮穿刺强度等茎秆力学性状指标，株高、穗位高、节间长和茎节长粗比与倒伏率呈显著或极显著正相关关系，节间干重、节间干重百分比、单位茎长干物质重和茎秆力学特征与倒伏率呈显著或极显著负相关关系，且以基部第 3 节的相关性最好，茎粗、单位茎长干物质重、茎秆力学性状指标等可作为评价茎秆抗倒伏能力的指标[11,13-20]。目前，关于玉米抗倒伏的研究主要集中于北方地区，且主要研究种植密度对茎秆性状的影响、茎秆性状与倒伏率的关系以及抗倒伏率评价指标的筛选等方面[11,13-21]，而关于西南地区玉米的抗倒伏研究以及玉米茎秆性状与产量之间的关系研究鲜见报道。近年来，随着种植制度和农业种粮大户的发展，小麦(*Triticum aestivum*)-夏玉米新两熟种植模式成为西南丘陵旱地重要的种植模式，目前未见该模式下密度对夏玉米茎秆性状及产量影响的研究。本研究通过设置不同的种植密度，系统地分析种植密度对川中丘陵夏玉米茎秆性状及产量的影响，并探讨种植密度、茎秆性状及产量三者之间的关系，为西南丘陵地区小麦-玉米种植系统下夏玉米高产栽培体系的构建提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验设在四川省德阳市中江县辑庆镇(30°35′N, 104°37′E)惠农粮食专业合作社试验田(丘陵旱地)，属亚热带湿润季风气候，年平均气温 16.7 ℃，年降水量 883 mm，无霜期 286 d，中江 2015 年的气象数

据见图 1。供试土壤耕层(0~20 cm)土壤基本理化性状：土壤容重 1.40 g·cm^{-3}，全氮 1.61 g·kg^{-1}，有机质 14.78 g·kg^{-1}，碱解氮 42.93 mg·kg^{-1}，有效磷 5.9 mg·kg^{-1}，速效钾 104.44 mg·kg^{-1}，pH 7.80。

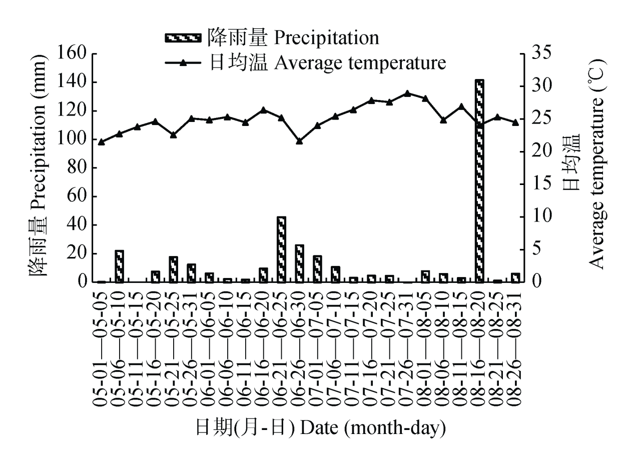


图 1 试验区 2015 年玉米生长期间(5—8 月)的降雨量和平均温度(中江)

Fig. 1 Precipitation and average temperature in every 5 days from May to August during the growth season of maize of 2015 in the study area (Zhongjiang)

1.2 试验设计

采用单因素随机区组设计，以四川省农业厅主推品种‘正红 505’(四川农业大学正红种业有限责任公司提供)为试验材料，设 5 个密度：4.50 万株·hm^{-2}(株距 27.78 cm)，5.25 万株·hm^{-2}(株距 23.81 cm)，6.00 万株·hm^{-2}(株距 20.83 cm)，6.75 万株·hm^{-2}(株距 18.52 cm)，7.50 万株·hm^{-2}(株距 16.67 cm)，采用宽窄行种植方式，宽行 1.2 m，窄行 0.4 m。试验重复 3 次，共 15 个小区，小区面积为 19.2 m^2。于 2015 年 5 月 14 日播种，8 月 25 日收获。播种前统一施用 N、P、K 配比为 25∶7∶8 的复合肥作为底肥一次施用，施用量为 900 kg·hm^{-2}。

1.3 测定的指标和方法

1.3.1 株高、穗位高、节间长和茎粗

于玉米吐丝后 7 d 和吐丝后 25 d 取样，每个小区选取有代表性植株 10 株，测量株高、穗位高、节间长(1、3、5 节间)和茎粗(1、3、5 节间)，并计算茎节长粗比(节间长/节间粗)、茎粗系数(茎粗系数=茎粗/株高×100%)和穗位高系数(穗位高系数=穗位高/株高×100%)。

1.3.2 外皮穿刺强度(rind penetration strength, RPS)

于玉米吐丝后 7 d 和吐丝后 25 d 取样，每个小区选取有代表性植株 3 株，取玉米地上部第 1、3、5 节间，剥除叶鞘，采用石家庄艾沃士科技有限公司生产的 AWOS-SL04 植物茎秆强度测定仪测定茎秆外皮穿刺强度，将横截面积为 0.01 cm^2 的探测头垂直于茎秆节间中部匀速缓慢插入，读取穿透茎秆表皮的最大值。

1.3.3 茎秆压碎强度(stalk crushing strength, SCS)

于玉米吐丝后 7 d 和吐丝后 25 d 取样，每个小区选取有代表性植株 3 株，取玉米地上部第 1、3、5 节间，剥除叶鞘，用石家庄艾沃士科技有限公司生产的 AWOS-SL04 植物茎秆强度测定仪测定茎秆压碎强度，将横截面积为 1 cm^2 的探测头垂直于茎秆节间中部匀速缓慢压下，直到茎秆破裂，读取最大值。

1.3.4 植株节间重

于玉米吐丝后 7 d 和吐丝后 25 d 取样，每个小区选取有代表性植株 3 株，取玉米地上部第 1、3、5 节间，剥除叶鞘，分别称取玉米茎秆各节间鲜重，然后在 105 ℃下杀青 60 min，再于 80 ℃下烘干至恒重后称重。计算茎秆干重百分比、单位茎长干物质重，其中茎秆节间干重百分比(%)=节间干重/节间鲜重×100，单位茎长干物质重=节间干重/节间长度(g·cm^{-1})。

1.3.5 玉米产量考种

玉米分小区实收测产，采用平均穗重法选取 20 个果穗进行室内考种，测定穗长、穗粗、千粒重等。

1.4 数据分析

采用 Microfost Excel 2007 进行数据处理，SPSS 19.0 软件进行数据统计与分析，采用 GraphPad Prism 5.0 绘图软件绘图。

2 结果与分析

2.1 种植密度对玉米茎秆农艺性状的影响

2.1.1 株高、穗位高、茎粗、穗位高系数和茎粗系数

由表 1 可知，随种植密度增加，玉米株高和穗位高呈增加趋势，茎粗和茎粗系数逐渐减小，而穗位高系数则呈先降低后增加的趋势，其中种植密度对株高、茎粗和茎粗系数影响显著(P<0.05)。6.75 万株·hm^{-2} 的株高和穗位高分别较 4.50 万株·hm^{-2} 提高 9.83%和 9.86%，7.50 万株·hm^{-2} 的茎粗和茎粗系数分别较 4.50 万株·hm^{-2} 降低 16.11%和 21.95%。吐丝后 25 d 的数据变化规律与吐丝后 7 d 基本一致。

2.1.2 节间长、节间粗和茎节长粗比

由表 2 可知，种植密度对玉米节间长、节间粗和茎节长粗比影响显著(P<0.05)，随密度的增加，玉米节间长和茎节长粗比呈增加趋势，而节间粗则逐渐减小；随节位的上升，节间逐渐增长变细。吐丝后 7 d，当密度增加到 6.75 万株·hm^{-2} 时，第 3 节节间长和长粗比分别较 4.50 万株·hm^{-2} 显著增加 31.00%和 51.62%，而 7.50 万株·hm^{-2} 的第 1、3、5 节节间粗则

表 1　不同种植密度下夏玉米的茎秆性状

Table 1　Stem traits of summer maize under different planting densities

测定时期 Measurement period	种植密度 Plant density (×10^4 plants·hm^{-2})	株高 Plant height (cm)	穗位高 Ear height (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	穗位高系数 Ear height coefficient (%)	茎粗系数 Stem diameter coefficient (%)
吐丝后 7 d 7 days after silking	4.50	258.25±1.75c	106.50±8.50a	2.11±0.04a	0.41±0.03a	0.82±0.02a
	5.25	266.32±5.39bc	107.17±8.89a	2.00±0.08b	0.40±0.02a	0.75±0.06ab
	6.00	273.58±6.00ab	107.75±6.66a	1.98±0.01b	0.39±0.02a	0.72±0.02b
	6.75	283.63±2.87a	110.00±2.69a	1.80±0.05c	0.41±0.01a	0.64±0.02c
	7.50	275.17±5.40ab	114.17±1.28a	1.77±0.04c	0.42±0.01a	0.64±0.03c
吐丝后 25 d 25 days after silking	4.50	253.00±3.61b	106.00±3.91a	2.15±0.06a	0.42±0.02a	0.85±0.04a
	5.25	265.83±8.54ab	107.27±7.40a	1.98±0.04b	0.40±0.02a	0.74±0.05b
	6.00	270.84±9.58ab	107.76±4.61a	1.88±0.08c	0.40±0.01a	0.70±0.02b
	6.75	282.00±6.24a	109.26±2.05a	1.80±0.12cd	0.42±0.02a	0.64±0.03c
	7.50	272.83±4.18a	112.23±4.58a	1.71±0.04d	0.42±0.03a	0.62±0.00c

不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。穗位高系数=穗位高/株高×100%，茎粗系数=茎粗/株高×100%。Different lowercase letters indicate significant differences at 5% level. Ear height coefficient = ear height / plant height × 100%. Stem diameter coefficient = stem diameter / plant height × 100%.

表 2　不同种植密度下夏玉米不同节位的节间长、节间粗和茎节长粗比

Table 2　Lengths, diameters and length to diameter ratios of internode of different nodes of summer maize under different planting densities

测定时期 Measurement period	种植密度 Plant density (×10^4 plants·hm^{-2})	节间长 Length of internode (cm)			节间粗 Diameter of internode (cm)			长粗比 LTDR
		1	3	5	1	3	5	3
吐丝后 7 d 7 days after silking	4.50	6.13±0.28b	11.58±0.58ab	16.33±0.33a	2.08±0.02a	2.08±0.03a	1.90±0.05a	5.56±0.07b
	5.25	6.76±0.24ab	12.10±2.02b	15.02±0.03b	1.97±0.06b	1.97±0.08b	1.84±0.11a	6.13±1.03b
	6.00	6.23±1.12b	12.26±1.08b	16.18±0.29ab	1.90±0.07b	1.96±0.03b	1.79±0.04a	6.25±0.52b
	6.75	7.92±0.45a	15.17±0.84a	16.83±0.58a	1.77±0.07c	1.80±0.05c	1.62±0.05b	8.43±0.68a
	7.50	7.53±0.52a	14.17±0.99ab	16.16±0.32ab	1.75±0.03c	1.77±0.02c	1.61±0.04b	8.00±0.65a
吐丝后 25 d 25 days after silking	4.50	7.80±0.37ab	11.73±0.33c	15.87±0.66b	2.15±0.02a	2.07±0.04a	1.84a±0.04	5.67±0.11c
	5.25	7.31±1.34b	12.53±1.80bc	16.10±0.80ab	1.98±0.05b	2.04±0.05a	1.88±0.09a	6.12±0.74c
	6.00	7.79±0.01ab	13.28±0.67abc	17.35±1.12ab	1.89±0.08c	1.85±0.07b	1.72±0.08b	7.19±0.14b
	6.75	7.83±0.63ab	13.69±0.81ab	17.40±0.35ab	1.75±0.11d	1.80±0.08b	1.66±0.08b	7.62±0.64b
	7.50	9.07±0.95a	14.94±0.12a	18.08±0.57a	1.67±0.03d	1.66±0.03c	1.52±0.02c	8.99±0.19a

不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences at 5% level. LTDR: length to diameter ratio.

分别较 4.50 万株·hm^{-2} 显著减小 15.87%、14.90%和 15.26%。吐丝后 25 d 的数据变化规律与吐丝后 7 d 基本一致。

2.1.3　节间干重、节间干重百分比

表 3 表明，随种植密度的增加，节间干重和节间干重百分比均呈逐渐减小的趋势。吐丝后 7 d, 7.50 万株·hm^{-2} 的第 1、3、5 节间干重分别较 4.50 万株·hm^{-2} 显著降低 22.55%、18.47%和 23.98%, 7.50 万株·hm^{-2} 的第 1 节间干重百分比分别较 4.50 万株·hm^{-2}、6.00 万株·hm^{-2} 显著降低 13.04%和 14.58%。吐丝后 25 d 的数据变化规律与吐丝后 7 d 基本一致，但吐丝后 25 d 处理间节间干重百分比差异不显著。

由吐丝后 7 d 到吐丝后 25 d，除基部节间外，各节间的干重均出现了不同程度的降低，节位越高下降越明显，这可能与干物质的就近转运和分配有关。节间干重百分比随节位的上升和生育时期的推进而呈增加的趋势，这可能与试验年份较为干旱有关，导致玉米植株含水量较低、干重百分比较高。

2.1.4　玉米单位茎长干物质重

由图 2 可知，密度对玉米单位茎长干物质重的影响较大，总体表现为低密度>高密度，第 1 节>第 3 节>第 5 节。吐丝后 7 d, 6.75 万株·hm^{-2} 密度处理的第 1、3、5 节的单位茎长干物质重明显降低，较 4.50 万株·hm^{-2} 显著降低 24.84%、22.21%和 25.24%。吐丝后 25 d 的数据变化规律与吐丝后 7 d 基本一致。由吐丝后 7 d 到吐丝后 25 d，由于茎秆的干物质向穗部转移，玉米各节间(除基部节间外)的节间干重均

表 3 不同种植密度下夏玉米不同节位的节间干物质积累

Table 3 Dry matter accumulation of internode of different nodes of summer maize under different planting densities

测定时期 Measurement period	种植密度 Plant density ($\times10^4$ plants·hm^{-2})	节间干重 Dry weight of internode (g)			节间干重百分比 Percent of dry weight (%)		
		1	3	5	1	3	5
吐丝后 7 d 7 days after silking	4.50	3.37±0.25a	5.36±0.39a	5.38±0.32a	18.33±1.25ab	15.59±0.34ab	21.18±1.85a
	5.25	3.16±0.05a	4.94±0.52ab	5.06±0.17ab	17.16±0.38abc	15.49±0.65ab	21.05±0.86a
	6.00	3.04±0.45ab	4.92±0.13ab	4.89±0.09b	18.66±0.12a	16.07±0.42ab	20.96±0.74a
	6.75	2.85±0.36ab	4.84±0.14ab	4.43±0.10c	16.41±2.17bc	16.74±0.45a	20.12±0.45a
	7.50	2.61±0.12b	4.37±0.15b	4.09±0.02c	15.94±0.43c	14.83±1.32b	19.64±0.34a
吐丝后 25 d 25 days after silking	4.50	4.11±0.36a	5.91±0.03a	4.32±0.32ab	25.41±1.16a	28.94±1.31a	29.87±1.44a
	5.25	3.34±0.25b	4.48±0.57ab	4.53±0.11a	26.03±1.09a	24.65±1.43a	27.52±2.01a
	6.00	3.32±0.32b	4.31±0.38ab	3.92±0.15ab	25.29±1.92a	23.59±1.24a	27.52±0.88a
	6.75	2.81±0.33b	4.21±0.24ab	3.79±0.32b	23.32±1.56a	23.50±1.30a	27.57±1.73a
	7.50	2.92±0.47b	3.70±0.26b	3.03±0.02c	23.91±1.79a	22.32±0.77a	25.67±1.16a

不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters indicate significant differencse at 5% level.

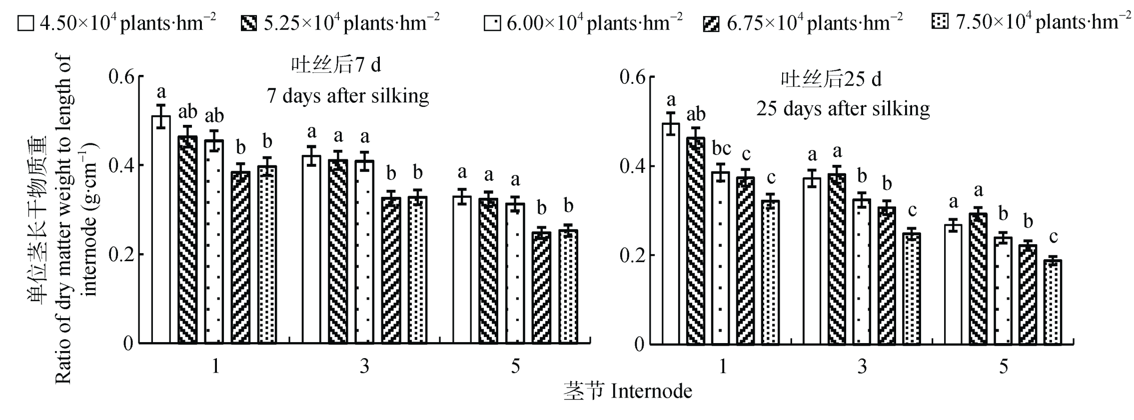


图 2 不同种植密度下夏玉米不同节位的单位茎长干物质重

Fig. 2 Dry matter weights per unit length of internode of different nodes of summer maize under different planting densities

不同小写字母表示同一节位不同密度之间在 0.05 水平差异显著。Different letters for the same node indicate significant differences among different planting densities ($P < 0.05$).

出现不同程度的下降，而节间长又基本保持不变或略有增长，从而导致各密度对应茎节的单位茎长干物质重均有不同程度的下降。

2.2 种植密度对玉米茎秆抗倒力学性状的影响

2.2.1 玉米茎秆压碎强度

由图 3 可知，随着种植密度的增加和茎节的延伸，茎秆压碎强度呈现逐渐降低的趋势。在吐丝后 7 d，当密度增加到 6.75 万株·hm^{-2}时，第 3、5 节间的压碎强度分别较 4.50 万株·hm^{-2}显著降低 14.15%和 27.71%。吐丝后 25 d 的数据变化规律与吐丝后 7 d 基本一致，从吐丝后 7 d 到吐丝后 25 d，各茎节的压碎强度均有不同程度的降低。

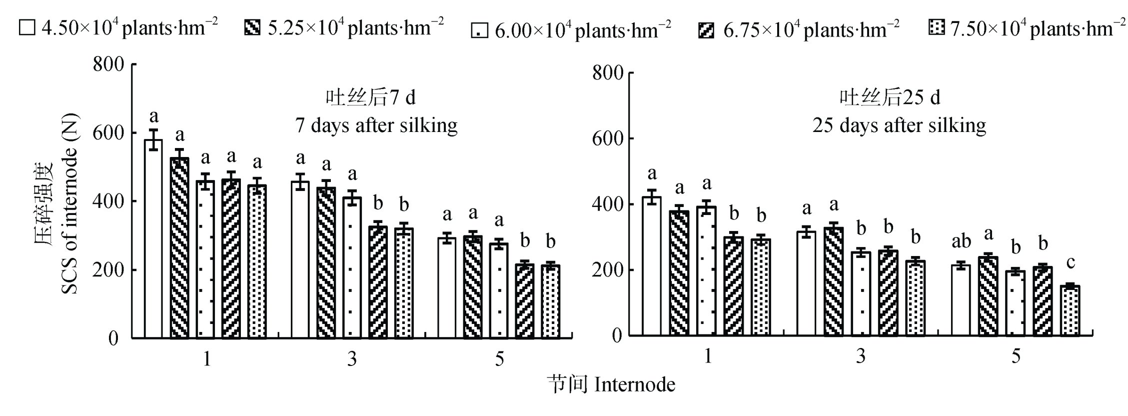


图 3 不同种植密度下夏玉米不同节位的压碎强度

Fig. 3 Stalk crushing strengths (SCS) of internode of different nodes of summer maize under different planting densities

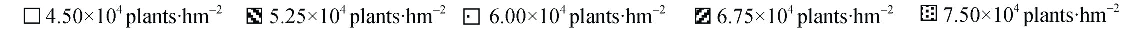
不同小写字母表示同一节位不同密度之间在 0.05 水平差异显著。Different letters for the same node indicate significant differences among different planting densities ($P < 0.05$).

2.2.2　玉米茎秆外皮穿刺强度

由图 4 可知，随种植密度的增加和节间的延伸，茎秆的外皮穿刺强度呈现逐渐降低的趋势。在吐丝后 25 d，当密度增加到 7.50 万株·hm^{-2} 时，第 1、3、5 节间外皮穿刺强度分别较 4.50 万株·hm^{-2} 显著降低 27.10%、22.78%和 30.80%。吐丝后 7 d 的数据变化规律与吐丝后 25 d 基本一致。

2.3　种植密度对玉米产量及其构成因素的影响

表 4 表明，种植密度对玉米产量影响显著。其中，群体产量随着密度的增加呈先增加后降低的趋势，产量最大值出现在 6.00 万株·hm^{-2} 处，而单株产量则显著性降低。与 4.50 万株·hm^{-2} 的种植密度相比，6.00 万株·hm^{-2} 显著增产 12.02%，单株产量显著降低 16.35%。此外，种植密度对穗长、穗粗、秃尖长、有效穗数、成穗率、穗粒数和千粒重影响显著(P<0.05)。当种植密度增加到 7.50 万株·hm^{-2} 时，玉米的穗长、穗粗、成穗率、穗粒数和千粒重分别较 4.50 万株·hm^{-2} 显著降低 7.56%、3.88%、14.69%、22.90%和 8.30%；而秃尖长和有效穗数则分别较 4.50 万株·hm^{-2} 显著增加 42.18%和 20.15%。由此可知，增加种植密度会损害玉米的穗部性状，导致玉米单株产量降低；而较高密度下玉米显著增产，这说明高密度下的群体生产力弥补了单株生产力的不足，从而使玉米群体产量增加，这也是增加种植密度能丰产的原因之一；但当种植密度超过最适密度时，有效穗数所产生的优势则不复存在，从而导致群体产量降低。



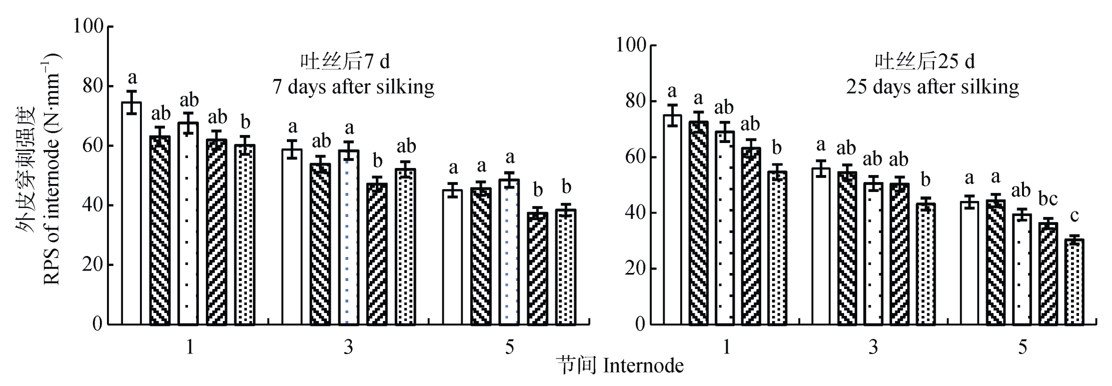


图 4　不同种植密度下夏玉米不同节位的穿刺强度

Fig. 4　Stalk rind penetration strengths (RPS) of internode of different nodes of summer maize under different planting densities

不同小写字母表示同一节位不同密度之间在 0.05 水平差异显著。Different letters for the same node indicate significant differences among different planting densities (P < 0.05).

表 4　不同种植密度下夏玉米穗部性状、产量和产量构成因素

Table 4　Ear character, yield and yield components of summer maize under different planting densities

种植密度 Plant density (×10^4 plants·hm^{-2})	穗长 Corncob length (cm)	穗粗 Corncob diameter (mm)	秃尖长 Barren tip length (cm)	有效穗数 Effective panicles number (panicle·hm^{-2})	成穗率 Spike rate (%)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-seed weight (g)	群体产量 Population grain yield (kg·hm^{-2})	单株产量 Grain yield per plant (kg·plant^{-1})
4.50	17.58±0.26a	49.53±0.92a	2.73±0.09b	36 631.94±1203a	81.40±2.67a	649.90±15.8a	197.56±10.44a	4 696.45±49.5c	0.104±0.001a
5.25	17.24±0.15a	49.03±0.78ab	2.88±0.27ab	42 534.72±1203b	81.02±2.29a	592.81±14.5b	195.63±1.56a	4 930.32±27.5b	0.094±0.000b
6.00	16.92±0.18ab	48.62±1.56ab	3.12±0.31ab	47 916.67±1378c	79.86±2.30a	577.12±27.5b	190.42±2.51ab	5 261.14±121.0a	0.087±0.002c
6.75	16.27±0.48b	48.16±2.07ab	3.28±0.05a	49 305.55±1591d	73.05±2.36b	530.16±34.6c	181.82±10.59b	4 739.70±88.3c	0.070±0.001d
7.50	16.25±0.63b	47.61±0.61b	3.28±0.43a	52 083.33±1563e	69.44±2.08c	501.07±17.5c	181.15±8.69b	4 720.79±50.0c	0.063±0.001e

不同小写字母表示 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences at 5% level.

2.4　玉米茎秆性状、产量和种植密度的关系

2.4.1　相关性分析

由表 5 可知，种植密度与株高、茎粗等指标的相关性达显著(P<0.05)或极显著水平(P<0.01)，其中，密度与株高、节间长、茎节长粗比呈正相关关系，而与茎粗、茎粗系数、节间粗、节间干重、单位茎长干物质重、穿刺强度、压碎强度和单株产量呈负相关关系。从茎秆农艺性状与茎秆力学性状的相关关系可以看出，茎粗、茎粗系数、节间粗、节间干重和单位茎长干物质重分别与茎秆外皮穿刺强度和压碎强度呈显著或极显著正相关关系，而株高、节间长和茎节长粗比则分别与茎秆外皮穿刺强度和压碎强度呈负相关或极显著负相关关系。其中，除节间干重外，茎秆外皮穿刺强度与茎秆农艺性状的相关

表 5 夏玉米茎秆性状、产量和种植密度的相关系数
Table 5 Correlation coefficients between stalk agronomic traits, yield and planting density of summer maize

Trait	*x*1	*x*2	*x*3	*x*4	*x*5	*x*6	*x*7	*x*8	*x*9	*x*10	*x*11
*x*2	0.84*	1.00									
*x*3	−0.97**	−0.87*	1.00								
*x*4	−0.97**	−0.93**	0.99**	1.00							
*x*5	0.85*	0.89*	−0.94**	−0.92**	1.00						
*x*6	−0.97**	−0.87*	1.00**	0.99**	−0.93**	1.00					
*x*7	0.90*	0.89*	−0.97**	−0.95**	0.99**	−0.97**	1.00				
*x*8	−0.93**	−0.66	0.89*	0.87*	−0.67	0.90*	−0.75	1.00			
*x*9	−0.90*	−0.80	0.96**	0.92**	−0.97**	0.96**	−0.99**	0.77	1.00		
*x*10	−0.97**	−0.73	0.91*	0.89*	−0.77	0.90*	−0.83*	0.90*	0.86*	1.00	
*x*11	−0.98**	−0.92**	0.98**	0.99**	−0.93**	0.98**	−0.96**	0.85*	0.94**	0.93**	1.00
*x*12	−0.96**	−0.78	0.98**	0.94**	−0.90*	0.98**	−0.94**	0.91*	0.96**	0.93**	0.95**

*x*1: 密度; *x*2: 株高; *x*3: 茎粗; *x*4: 茎粗系数; *x*5: 节间长; *x*6: 节间粗; *x*7: 茎节长粗比; *x*8: 节间干重; *x*9: 单位茎长干物质重; *x*10: 穿刺强度; *x*11: 压碎强度; *x*12: 单株产量; *和**分别表示 5%和 1%水平极显著相关。*x*1: planting density; *x*2: plant height; *x*3: stem diameter; *x*4: stem diameter coefficient; *x*5: length of internode; *x*6: diameter of internode; *x*7: ratio of length to diameter of internode; *x*8: dry weight of internode; *x*9: ratio of dry matter weight to length of internode; *x*10: rind penetration strength of internode; *x*11: stalk rind penetration strength of internode; *x*12: grain yield per plant. * and ** denote significant correlation at 5% and 1% levels, respectively.

系数均小于茎秆压碎强度，这说明茎秆压碎强度与茎秆农艺性状的相关性更好。此外，茎秆外皮穿刺强度与压碎强度的相关性达极显著水平(r=0.93**)。从茎秆性状与单株产量的相关关系可以看出，单株产量与株高、节间长和茎节长粗比呈负相关关系，而与茎粗、茎粗系数、节间粗、节间干重、单位茎长干物质重、茎秆外皮穿刺强度和压碎强度呈正相关关系，除株高外，其余各指标均与单株产量的相关性均达到了显著水平。

2.4.2 多元回归分析

以相关分析的各农艺性状指标为自变量(X)，茎秆压碎强度为因变量(Y_1)，进行逐步回归分析，剔除不显著的自变量得到最优回归方程式。

$$Y_1=-103.065+549.971X_3+222.068X_8 \qquad (P<0.05)$$

从方程式可以看出，茎粗系数(X_3)和单位茎长干物质重(X_8)对茎秆压碎强度的影响最大，二者对茎秆压碎强度的正效应达到了显著水平，可以作为评价玉米茎秆抗倒伏能力的重要农艺指标。

3 讨论

3.1 种植密度对玉米茎秆性状的影响

种植密度显著影响玉米茎秆性状。前人研究表明，随种植密度的增加，株高、穗位高逐渐升高[8,22]，穗位高系数[1,23]和节间长[11,22]逐渐增大，茎粗、茎粗系数[1,19]、节间干重[11,19]、节间干重百分比[11]、单位茎长干物质重[11,24]、压碎强度和穿刺强度[11,23-24]逐渐减小。本试验的研究结果与前人的研究结果基本一致。随种植密度的增加，植株个体间的竞争加剧，植株个体营养缺乏，进而植株个体干重下降、茎秆强度降低，最终导致玉米植株抗倒伏能力下降。本试验还研究了玉米茎秆的节间长粗比，结果表明茎节长粗比与密度呈显著正相关(r=0.90*)，这与王娜等[16]的研究结果一致。李霞等[25]也发现，节间长粗比小、茎粗系数大的玉米植株抗倒伏能力强。这说明随种植密度的增加，茎节长粗比逐渐增大，玉米植株的抗倒伏能力则逐渐变弱。

3.2 种植密度对玉米产量及其构成因素的影响

玉米产量由单位面积有效穗数、穗粒数和千粒重构成，增加种植密度是玉米增产的主要措施。玉米要获得高产，必须要构建合理的群体结构，协调产量构成三因素间的矛盾，使三者的乘积达到最大值[3]。前人研究表明，种植密度显著影响玉米的产量构成性状，随着密度增加，穗长变短，秃尖变长，穗粗变细，行粒数、穗粒数和千粒重变小，导致单株产量降低[26-27]。本试验研究结果与前人的研究结果一致，随着种植密度的增加，玉米的单株产量降低，群体产量先增后减。川中丘陵夏玉米的适宜密度应该综合考虑产量、植株茎秆性状、植株倒伏率甚至植株病虫为害情况。从本试验的结果来看，当种植密度增加到 6.00 万株·hm^{-2} 时，产量达到最大值。但综合考虑产量、抗倒和生产实际等因素，夏玉米的适宜密度应该在 5.25~6.75 万株·hm^{-2} 的范围之内，后续试验可进一步细化种植密度，以探究川中丘陵区夏玉米种植的最适密度。

3.3 茎秆农艺性状、茎秆抗倒力学性状之间的关系

勾玲等[11]研究表明，茎秆压碎强度和外皮穿刺强度分别与茎秆干重百分比和单位茎长干物质重呈极显著正相关关系，与节间长度呈极显著负相关关系，且茎秆压碎强度与外皮穿刺强度也呈极显著正

相关关系。李得孝等[21]研究表明, 玉米外皮穿刺强度与株高、穗位高和节间长呈显著或极显著正相关。高鑫等[24]研究表明, 单位长度干重(即单位茎长干物质重)与茎秆力学特征呈极显著正相关。本试验研究结果与前人基本一致。其中, 除节间干重外, 茎秆农艺性状与茎秆压碎强度的相关系数均大于茎秆外皮穿刺强度, 这可能解释了随生育时期的推进, 茎秆压碎强度降低幅度大于外皮穿刺强度的现象。逐步回归分析进一步表明, 茎粗系数和单位茎长干物质重对玉米茎秆压碎强度的正向影响最大, 可以作为评价玉米茎秆抗倒伏能力的重要指标。由此可见, 玉米茎秆性状间关系密切, 在实际育种工作中, 要注意协调各性状之间的关系, 以培育出综合性状好, 抗倒能力强的玉米品种。

3.4 茎秆性状与产量之间的关系

茎秆性状的优劣会影响玉米最终的收获产量。李得孝等[21]研究表明, 茎粗与籽粒产量呈极显著正相关, 株高和节间长与产量呈显著或极显著负相关, 而籽粒产量与穗位高呈正相关、与穿刺强度呈负相关但相关性均不显著。黄艳玲等[28]研究表明, 水稻各节间粗和单位茎节干重分别与每株有效穗数和每穗总粒数呈负相关。本试验研究结果显示, 单株产量与茎粗、茎粗系数、节间粗、节间干重、单位茎长干物质重、压碎强度和穿刺强度呈正相关关系, 与株高、节间长和茎节长粗比呈负相关关系, 除株高外, 其余各指标均与单株产量的相关性均达到了显著水平。由此可见, 玉米植株的茎秆性状与单株产量关系密切, 茎粗、节间干重、单位茎长干物质重、压碎强度和穿刺强度是影响玉米产量的重要指标。因此, 在构建川中丘陵夏玉米高产栽培体系时, 要充分把握单株产量与茎秆性状间的关系, 协调二者间的矛盾, 力争达到高产抗倒的局面。

4 结论

种植密度显著影响玉米的茎秆性状和产量, 当种植密度增加到 6.00 万株·hm^{-2}时, 群体产量达到最大值, 较 4.50 万株·hm^{-2}显著增产 12.02%; 随种植密度的增加, 玉米的株高、穗位高、节间长、茎节长粗比显著增加, 茎粗、茎粗系数、节间干重、单位茎长干物质重、茎秆压碎强度和外皮穿刺强度显著性降低。茎秆农艺性状与茎秆力学性状之间关系密切, 茎粗、茎粗系数、节间粗、节间干重和单位茎长干物质重分别与茎秆外皮穿刺强度和压碎强度呈显著和极显著正相关关系, 而株高、节间长和茎节长粗比则分别与茎秆外皮穿刺强度和压碎强度呈负相关或极显著负相关关系。其中, 茎秆压碎强度与茎秆农艺性状的相关性更好, 茎粗系数和单位茎长干物质重对茎秆压碎强度的影响最大。茎秆性状与单株产量之间相关性达显著或极显著水平, 产量与节间长和茎节长粗比呈显著负相关关系, 而与茎粗、茎粗系数、节间粗、节间干重、单位茎长干物质重、茎秆压碎强度和外皮穿刺强度呈显著或极显著正相关关系。可见, 密度是影响玉米茎秆性状和产量的重要因素, 适当增加种植密度可以显著提高玉米群体产量, 茎粗系数和单位茎长干物质重可以作为评价玉米茎秆抗倒伏能力的重要农艺指标。

参考文献 References

[1] 刘魏魏, 赵会杰, 李红旗, 等. 密度、种植方式对夏玉米茎秆抗倒伏能力的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(8): 75–78
Liu W W, Zhao H J, Li H Q, et al. Effects of planting densities and modes on stem lodging resistance of summer maize[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(8): 75–78

[2] 查丽, 谢孟林, 朱敏, 等. 垄作与覆膜对川中丘陵春玉米根系分布及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 855–862
Zha L, Xie M L, Zhu M, et al. Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on root distribution and yield of spring maize in hilly area of central Sichuan basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 855–862

[3] 梁书荣, 赵会杰, 李洪岐, 等. 密度、种植方式和品种对夏玉米群体发育特征的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1927–1931
Liang S R, Zhao H J, Li H Q, et al. Effects of planting densities and modes on developmental characteristics of summer maize populations in two varieties[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1927–1931

[4] 刘伟, 张吉旺, 吕鹏, 等. 种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1301–1307
Liu W, Zhang J W, Lv P, et al. Effect of plant density on grain yield dry matter accumulation and partitioning in summer maize cultivar Denghai 661[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1301–1307

[5] Liu W D, Tollenaar M. Response of yield heterosis to increasing plant density in maize[J]. Crop Science, 2009, 49(5): 1807–1816

[6] 王云奇, 李金鹏, 王志敏, 等. 一穴多株种植对夏玉米群体质量和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 173–182
Wang Y Q, Li J P, Wang Z M, et al. Effects of more plants per hill on population quality and yield of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(2): 173–182

[7] 黄海, 常莹, 吴春胜, 等. 群体密度对玉米茎秆强度及相关生理指标的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4): 81–87
Huang H, Chang Y, Wu C S, et al. Effects of population density on strength and related physiological indexes of maize

stalk[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(4): 81–87

[8] 李洪梅, 王西芝, 蒋明洋, 等. 不同种植密度对夏玉米农艺性状及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2015, 47(7): 59–61
Li H M, Wang X Z, Jiang M Y, et al. Effects of different plant densities on agronomic characters and yield of summer maize[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(7): 59–61

[9] van Roekel R J, Coulter J A. Agronomic responses of corn to planting date and plant density[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(5): 1414–1422

[10] 李树岩, 王宇翔, 胡程达, 等. 抽雄期前后大风倒伏对夏玉米生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2405–2413
Li S Y, Wang Y X, Hu C D, et al. Effects of strong wind lodging at pre- and post-tasseling stages on growth and yield of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2405–2413

[11] 勾玲, 黄建军, 张宾, 等. 群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1688–1695
Gou L, Huang J J, Zhang B, et al. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(10): 1688–1695

[12] 陈尚洪, 陈红琳, 沈学善, 等. 密度和施氮量对丘陵区机播夏玉米产量及倒伏影响研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(3): 805–808
Chen S H, Chen H L, Shen X S, et al. Effects of planting density and nitrogen application on yield and lodging of mechanized sowing summer maize[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(3): 805–808

[13] Zuber M S, Grogan C O. A new technique for measuring stalk strength in corn[J]. Crop Science, 1961, 1(5): 378–380

[14] Remison S U, Akinleye D. Relationship between lodging, morphological characters and yield of varieties of maize (*Zea mays* L.)[J]. The Journal of Agricultural Science, 1978, 91(3): 633–638

[15] 丰光, 景希强, 李妍妍, 等. 玉米茎秆性状与倒伏性的相关和通径分析[J]. 华北农学报, 2010, 25(S1): 72–74
Feng G, Jing X Q, Li Y Y, et al. Correlation and path analysis of lodging resistance with maize stem characters[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(S1): 72–74

[16] 王娜, 李凤海, 王志斌, 等. 不同耐密型玉米品种茎秆性状对密度的响应及与倒伏的关系[J]. 作物杂志, 2011(3): 67–70
Wang N, Li F H, Wang Z B, et al. Response to plant density of stem characters of maize hybrids and its relationship to lodging[J]. Crops, 2011(3): 67–70

[17] Ma D L, Xie R Z, Liu X, et al. Lodging-related stalk characteristics of maize varieties in China since the 1950s[J]. Crop Science, 2014, 54(6): 2805–2814

[18] 刘卫星, 王晨阳, 王强, 等. 不同玉米品种茎秆抗倒特性及其与产量的关系[J]. 河南农业科学, 2015, 44(7): 17–21
Liu W X, Wang C Y, Wang Q, et al. Stalk lodging-resistance property and its correlation with yield among different maize varieties[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(7): 17–21

[19] 程云, 王枟刘, 杨静, 等. 种植密度对夏玉米基部节间性状与倒伏的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(5): 112–116
Cheng Y, Wang Y L, Yang J, et al. Effects of planting density on characteristics of basal internodes and lodging in summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(5): 112–116

[20] 勾玲, 黄建军, 孙锐, 等. 玉米不同耐密植品种茎秆穿刺强度的变化特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 156–162
Gou L, Huang J J, Sun R, et al. Variation characteristic of stalk penetration strength of maize with different density-tolerance varieties[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 156–162

[21] 李得孝, 员海燕, 周联东. 玉米抗倒伏性指标及其模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 53–56
Li D X, Yuan H Y, Zhou L D. Selection and estimation of indices of stem-lodging resistance in corn[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004, 32(5): 53–56

[22] 姚敏娜, 施志国, 薛军, 等. 种植密度对玉米茎秆皮层结构及抗倒伏能力的影响[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(11): 2006–2014
Yao M N, Shi Z G, Xue J, et al. The effects of different planting densities on the cortex structure of steam and lodging resistance in maize[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(11): 2006–2014

[23] 刘鑫. 不同玉米品种在不同密度下抗倒伏性能的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012
Liu X. Studies on lodging-resistance performance of maize varieties under different plant density conditions[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2012

[24] 高鑫, 高聚林, 于晓芳, 等. 高密植对不同类型玉米品种茎秆抗倒特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(4): 69–73
Gao X, Gao J L, Yu X F, et al. Stalks lodging-resistance characteristics and yield traits among different maize varieties under high close planting[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(4): 69–73

[25] 李霞, 张吉旺, 任佰朝, 等. 小麦玉米周年生产中耕作对夏玉米产量及抗倒伏能力的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(6): 1093–1101
Li X, Zhang J W, Ren B Z, et al. Yield and lodging resistance of summer maize under different winter wheat-summer maize tillage systems[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(6): 1093–1101

[26] 张洪生, 赵明, 吴沛波, 等. 种植密度对玉米茎秆和穗部性状的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(5): 130–133
Zhang H S, Zhao M, Wu P B, et al. Effects of the plant density on the characteristics of maize stem and ear[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(5): 130–133

[27] Gobeze Y L, Ceronio G M, Van Rensburg L D. Effect of row spacing and plant density on yield and yield component of maize (*Zea mays* L.) under irrigation[J]. Journal of Agricultural Science and Technology B, 2012, 2: 263–271

[28] 黄艳玲, 石英尧, 申广勒, 等. 水稻茎秆性状与抗倒伏及产量因子的关系[J]. 中国农学通报, 2008, 24(4): 203–206
Huang Y L, Shi Y Y, Shen G L, et al. Study on the relationship between rice lodging resistance and culm traits & the yield factors[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(4): 203–206